0254-6124/2016/36(2)-139–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHENG Zhengwei, SHI Jiankui, LIU Zhenxing. Statistical study on IMF B_y control of the FAC in the magnetotail (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(2): 139-146. DOI:10.11728/cjss2016.02.139

行星际磁场 B_y 分量对磁尾场向电流的控制作用*

程征伟 史建魁 刘振兴

(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 利用 Cluster 卫星的磁场探测数据及 ACE 卫星的行星际磁场 (IMF) 探测数据, 研究了 IMF B_y 分量 (IMF $|B_y| < 10\,\text{nT}$) 对磁尾等离子体片边界层 (PSBL) 区场向电流发生率和密度的影响. 研究显示: 与 IMF B_y 分量为负时进行比较, IMF B_y 分量为正时场向电流的发生率更高, 约 55.6%; 当 IMF $|B_y| > 4\,\text{nT}$ 时场向电流发生率占总发生率的 77.4%; 场向电流发生率随 IMF $|B_y|$ 的增大而增大, 且具有很好的线性相关关系, 当 IMF B_y 分量为正时, 相关性更好; 场向电流密度也随 IMF $|B_y|$ 的增大而增大, 同样具有很好的线性相关关系, 当 IMF B_y 分量为正时, 相关性更好. 以上结果表明, IMF B_y 分量对磁尾场向电流的产生和变化具有很强的控制作用, 并且昏向 IMF 变化与场向电流变化的关系更加密切.

关键词 场向电流, 等离子体片边界层, 行星际磁场 B_y 分量

中图分类号 P 353.2

Statistical Study on IMF B_y Control of the FAC in the Magnetotail

CHENG Zhengwei SHI Jiankui LIU Zhenxing

(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Using the magnetic field data from Cluster spacecraft and the Interplanetary Magnetic Field (IMF) data from ACE spacecraft, the effect of IMF B_y component (IMF $|B_y| < 10\,\text{nT}$) on the Field-Aligned Current (FAC) occurrence rate and density at the Plasma Sheet Boundary Layer (PSBL) in the magnetotail is investigated. 1657 FAC cases from July to October in 2001 and 2004 were selected for analysis. We present that the IMF B_y component plays a very important role in controlling the occurrence rate and density of the FAC in the PSBL in the magnetotail. The FAC occurrence is higher (about 55.6%) when the IMF B_y is positive compared with that when the IMF B_y is negative. When the IMF $|B_y|$ is more than 4 nT, the occurrence rate of FAC is about 77.4%. The FAC occurrence in the magnetotail has an obvious positive correlation with the IMF $|B_y|$, and when the IMF B_y is positive, this correlation is better. The FAC density also has an obvious positive correlation with the IMF $|B_y|$, and when the IMF B_y is positive, this correlation is better. The above

* 国家自然科学基金项目 (41374169, 41474137, 41274146) 和国家重点实验室专项基金项目共同资助

2015-01-29 收到原稿, 2015-05-29 收到修定稿

E-mail: zwcheng@spaceweather.ac.cn

results show that the IMF B_y component has strong control on the occurrence and density of the FAC cases in the magnetotail, and that the change of FAC is closely associated with the duskward IMF (the IMF B_y is positive).

Key words Field-aligned currents, Plasma sheet boundary layers, Interplanetary magnetic field B_y component

0 引言

场向电流 (FAC) 是空间物理研究的热点问题, 是电离层与磁层耦合过程中的重要现象, 受到太阳风和行星际磁场 (IMF) 的调控, 在太阳风–磁层–电离层耦合过程中起到至关重要的作用. 场向电流首次被卫星观测证实是在 20 世纪 60 年代中期 [1−2], 随后其研究区域随探测技术的发展, 从低高度电离层扩展到内磁层乃至近地磁尾和远磁尾. 同时, 研究重点也从早期对场向电流自身特性的研究转入对场向电流受控太阳风条件和行星际磁场的研究.

地球空间不同区域的场向电流都会受到 IMF 的调控, IMF 各参量 (IMF B_z, IMF 锥角和时钟角, IMF B_y 等) 对场向电流的特性, 例如发生率、密度、分布会产生不同程度的影响 [3−5]. 研究表明, 场向电流会受到 IMF B_y 的控制. Iijima 等 [6] 研究发现, 在 IMF 北向条件下, 极区电离层的场向电流系会变得更加复杂, 在更高纬度的 I 区场向电流的极侧会产生一个新的电流结构, 极性与 I 区场向电流正好相反. Jiao 等 [7] 在对内磁层场向电流研究时发现, 绝大多数场向电流事件发生在 IMF 南向期间. Juusola 等 [8] 利用 CHAMP 卫星 5 年的探测数据, 对电离层场向电流做了统计研究, 发现当 IMF 南向时, 场向电流会随着 IMF $|B_z|$ 的增大而增强, 但是当 IMF 北向时, 二者却没有明显的关系. Gjerloev 等 [9] 的研究显示, 向阳侧的场向电流对 IMF B_z 没有明显的依赖作用, 但背阳侧的场向电流会随 IMF B_z 有明显的变化.

还有一些分析研究表明, 场向电流的变化与 IMF 锥角和时钟角的变化有着密切关系. Weimer 等 [10] 研究给出了高纬电离层中场向电流分布随 IMF 时钟角的变化关系, 结果显示, 高纬电离层场向电流分布与 IMF 时钟角的变化密切相关. Cheng 等 [11] 研究了磁尾场向电流发生率与 IMF 锥角的变化关系, 研究显示场向电流的发生率随着 IMF 锥角的增大而增大.

在场向电流与 IMF 关系的研究中, 场向电流与 IMF B_y 关系的研究是最多也是最重要的一部分. 这主要是因为, 场向电流主要表现为磁场 B_y 分量的扰动变化, 而 IMF B_y 分量可以直接渗透磁层内部, 引起磁层中磁场 B_y 分量的扰动 [12], 进而影响场向电流. 可见 IMF B_y 对场向电流起到了极其重要的作用. 在相关研究中, 向阳侧区域 (如极隙/尖区, 极盖区等) 场向电流受控于 IMF B_y 的变化是最早同时也是最多被研究的 [13−15]. Yamauchi 和 Araki[16] 利用低高度 Magsat 卫星研究发现, 平静时期向阳侧极尖区场向电流对 IMF B_y 有明显依赖作用. Zhou 等 [17] 利用 POLAR 卫星的探测数据, 研究发现高纬高高度磁层范围内的场向电流流向受到 IMF B_y 的调控.

实际上, IMF B_y 不仅对向阳侧区域的场向电流有明显控制作用, 对背阳侧极区场向电流同样具有重要影响. Taguchi[18] 研究发现, 靠近夜侧极光椭圆卵的场向电流受到 IMF B_y 的控制, 其电流强度随着 IMF $|B_y|$ 的增加而增大. 随后 Taguchi 等 [19] 又发现当 IMF 相对稳定时, 夜侧极光椭圆卵会产生一个受 IMF B_y 控制的对流结构. 并且当 IMF 较强时, 该区域的场向电流结构是与这个对流结构紧密联系的. 夜侧磁尾的场向电流与 IMF B_y 关系的研究则比较少, 主要是因为磁尾探测电流相对困难. 以往靠单/双卫星探测只能得到电流强度, 再根据卫星移动速度估算电流片厚度, 这样得到的电流密度存在较大误差. 更为重要的是, 由于只能分辨卫星进出场向电流片时的电流变化, 得到的场向电流事件数目相对较少, 使得统计研究受到了极大的限制. Cluster 星簇卫星计划为地球空间场向电流研究提供了三维的多点探测数据, 可以更准确地计算场向电流 [20−22].

本文主要利用 Cluster 四颗卫星的探测数据, 通过计算磁场旋度准确求得电流密度, 并选取大量的场向电流事件进行统计研究, 给出 IMF B_y 与磁尾等离子体片边界层区场向电流发生率与密度的关系.

1 探测数据和场向电流事件选取

1.1 探测数据

使用数据包括 Cluster 卫星和 ACE 卫星的探测数据. 其中 Cluster 卫星的探测数据包括 GSM 坐标系下 4 s 分辨率的磁场数据、电子数据和高能离子数据. Cluster 卫星的远地点为 19.6 R_e, 轨道周期为 57 h, 每年 7—11 月会穿越磁尾等离子体片. 根据其轨道周期, Cluster 每年有 60 天左右穿越磁尾等离子体片. ACE 卫星提供了 1 min 分辨率的 IMF B_y 分量数据. 本文选取 2001 和 2004 年 7—10 月的数据, 主要是因为 2001 年和 2004 年 Cluster 卫星穿越磁尾等离子体片边界层区时, 4 颗卫星两两之间的距离分别约为 2000 km 和 1000 km, 相对于磁尾等离子体片边界层区场向电流的空间尺度而言, 更有利于探测其特性.

1.2 场向电流密度计算和事件选取

根据 Cluster 四颗卫星的磁场探测数据, 由 Curlometer 方法 [23] 可以直接计算磁场旋度, 进而通过安培定律得到电流密度, 再将电流投影到磁场方向即可得到场向电流. 由于四颗卫星空间位形和磁场结构对计算电流会有很大影响, 所以必须考虑卫星的探测数据质量 Q, 即磁场散度与磁场旋度比值的绝对值 ($Q = |\nabla \cdot \boldsymbol{B}/\nabla \times \boldsymbol{B}|$)[24−25]. 这里采用 $Q < 0.3$ 作为数据质量标准, 以保证计算误差较小.

在选取等离子体片边界层区场向电流时, 主要根据 β 值确定等离子体片边界层区的位置. 但如果 Cluster 的电子或高能离子数据缺失或者不全, 则根据磁场数据进行判断 [26−27]. 同时, 对场向电流密度 ($J_{\rm FAC}$) 也做了规定, 要求电流密度 $|J_{\rm FAC}| > 2.38\,{\rm nA{\cdot}m^{-2}}$. 另外, 要求两个独立的场向电流事件的间隔大于 5 min[5,26].

依据上述方法, 共选取 1839 个磁尾等离子体片边界层区场向电流事件. 随后将场向电流事件与 IMF B_y 进行了一一对应. 根据太阳风速度计算得到从 ACE 卫星到向阳侧磁层顶的时延为 48~76 min; 根据 Collier 等 [28] 的方法给出不同事件从磁层顶到磁尾的时延范围为 0~5 min. 在这 1839 个事件中, 有 1657 个对应的 IMF B_y 小于 10 nT, 而 IMF B_y 大于 10 nT 的事件相对较少且分布分散, 有些属于极端空间天气条件下的研究范围, 所以这里只对这 1657 个场向电流事件进行了统计分析.

2 分析与讨论

图 1 所示为不同 IMF B_y 条件下磁尾观测到的场向电流事件. 图中采用 GSM 坐标系, 场向电流的位置实际上是其在 xy 平面内的投影位置. 场向电流

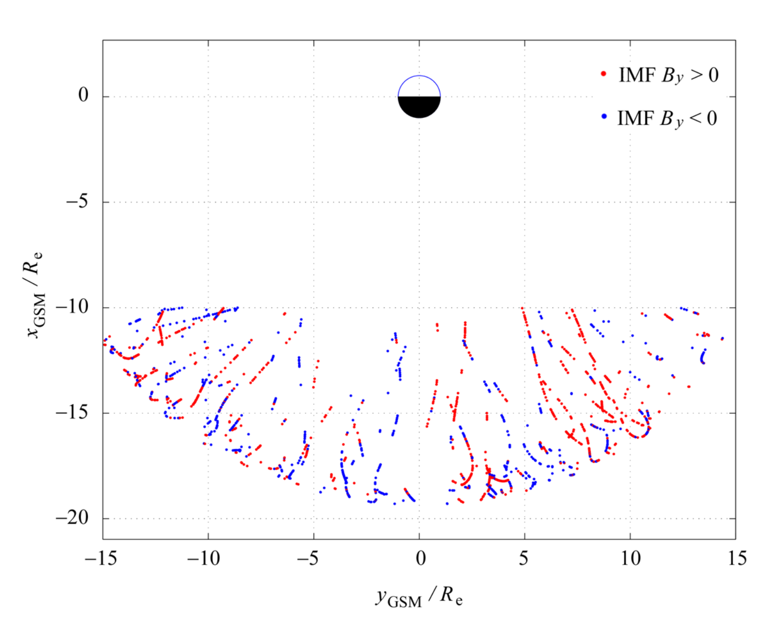


图 1 不同 IMF B_y 条件下磁尾观测到的场向电流事件

Fig. 1 FAC observations in the magnetotail under different IMF B_y conditions

均匀分布在磁尾 $-19\,R_\mathrm{e} < x_\mathrm{GSM} < -10\,R_\mathrm{e}$, $-15\,R_\mathrm{e} < y_\mathrm{GSM} < 15\,R_\mathrm{e}$ 的范围内. 而这一区域的场向电流与极区夜侧的场向电流相连, 所以磁尾场向电流研究对于确定磁层–电离层大尺度场向电流的传输特性有着重要意义.

下面以 2 nT 为统计步长, 将 IMF B_y 划分为 10 个统计区间, 统计得到不同 IMF B_y 条件下场向电流的发生数目, 结果列于表 1. 从表 1 可以看出当 IMF B_y 为正时, 在 $[2,4)$ nT 区间内观测到的场向电流事件最多. 当 IMF B_y 为负时, 在 $(-4,-2]$ nT 区间内观测到的场向电流事件最多. 但是场向电流在这两个范围内的发生数目最多, 并不能说明在这种 IMF 条件下其发生率最高. 这是因为在 Cluster 卫星穿越磁尾的过程中, 不同 IMF B_y 条件下总的观测时间也不同. 观测到的事件数目多, 可能是在这种条件下的观测时间长所引起的.

因此, 这里统计了各个 IMF B_y 范围内的观测时间, 然后计算了场向电流事件发生数目与观测时间的比值, 将结果归一化, 最后得到场向电流在不同 IMF B_y 条件下的发生率, 如图 2 所示. 这样得到的场向电流发生率更能说明在哪种 IMF B_y 条件下更容易产生场向电流事件. 从图 2 中可以清楚看到: 当 IMF $B_y > 0$ 时, 场向电流的发生率随着 IMF B_y 的增大而增大, 并且当 IMF B_y 在 $[4,6)$ nT 和 $[6,8)$ nT 两个区间时场向电流发生率增大的幅度最大, 当 IMF B_y 在 $[8,10)$ nT 时, 场向电流发生率达到最大值 16.6%; 当 IMF $B_y < 0$ 时, 场向电流的发生率随 IMF $|B_y|$ 的变化关系并没有像 IMF $B_y > 0$ 时那样单调增大, 当 IMF B_y 在 $(-10,-8]$ nT 区间时, 其发生率略小于在 $(-8,-6]$ nT 区间的发生率, 场向电流发生率的最小值出现在 $(-4,-2]$ nT 区间, 其发生率只有 4.7%; 此外还可以看到, 当 IMF $|B_y|$ 在 $[4,6)$ nT 和 $[6,8)$ nT 两个区间时, 场向电流发生率增大的幅度最大.

从图 2 还可以看到, 当 IMF $|B_y| < 4$ nT 时场向电流的发生率均相对较低. 经过计算, 当 IMF $|B_y| >$ 4 nT 时场向电流的发生率占总发生率的 77.4%, 表明大的 IMF B_y 分量确实更容易产生场向电流事件. 另外, 当 IMF B_y 分量为正时场向电流事件的发生率更高, 占总发生率的 55.6%, 表明该 IMF 条件更有利于场向电流的产生. 在两种 IMF 条件下, 场向电流发生率最大值与最小值之比分别约为 2.8 (IMF $B_y < 0$ 时) 和 3.0 (IMF $B_y > 0$ 时), 表明 IMF B_y 的变化对场向电流的产生有着非常显著的控制作用.

为了比较 IMF $B_y > 0$ 和 IMF $B_y < 0$ 时 IMF B_y 与场向电流发生率的关系, 对计算得到的场向电流发生率分别进行线性拟合, 结果如图 3 所示. 图 3 分别给出了 IMF $B_y < 0$ 和 IMF $B_y > 0$ 条件下的拟合结果, 为便于比较, 横坐标均取 IMF B_y 的绝对值, 纵坐标为归一化的发生率. 当 IMF $B_y < 0$ 和 IMF $B_y > 0$ 时, 其相关系数 R 分别达到 0.93 和 0.98. 这表明两种情况下, 场向电流的发生率都是随 IMF $|B_y|$ 的增加而增大, 符合线性相关关系. 只不过当 IMF

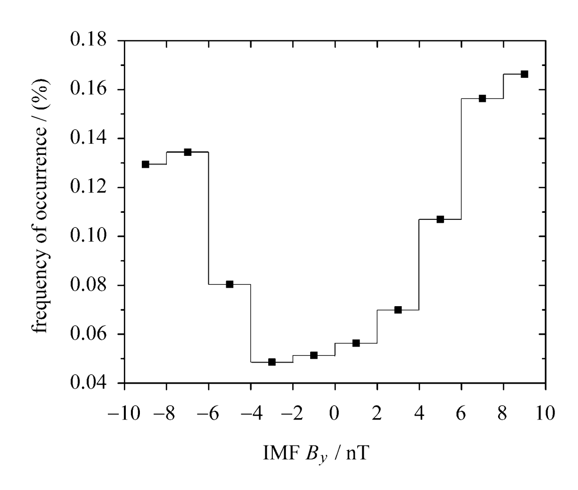


图 2 归一化场向电流发生率与 IMF B_y 的关系

Fig. 2 Normalized frequency of occurrence of FAC with IMF B_y

表 1 不同 IMF B_y 范围内场向电流事件数目

Table 1 Case number of FAC under different IMF B_y

IMF $B_y(>0)$/nT	[0, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10)
case number	199	248	237	161	72
IMF $B_y(<0)$/nT	$(-2,0]$	$(-4,-2]$	$(-6,-4]$	$(-8,-6]$	$(-10,-8]$
case number	199	205	174	120	42

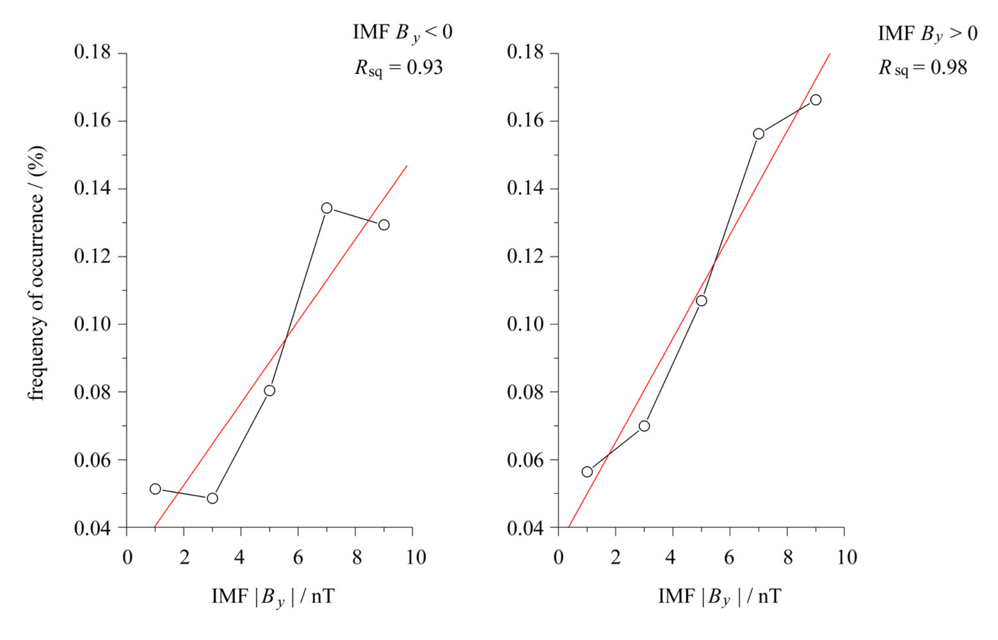


图 3 IMF $B_y < 0$ 和 IMF $B_y > 0$ 时场向电流发生率 (黑线) 与其线性拟合结果 (红线)

Fig. 3 Occurrence of FAC (black line) and its linear fitting result (red line) at IMF $B_y < 0$ and IMF $B_y > 0$, respectively

$B_y > 0$ 时, 线性相关关系更好. 另外, 从图 3 还可以清楚看出, 在各个 IMF $|B_y|$ 区间, IMF $B_y > 0$ 条件下场向电流的发生率均高于相应 IMF $B_y < 0$ 条件下场向电流的发生率.

以上研究显示, 晨向 IMF (IMF $B_y < 0$) 与昏向 IMF (IMF $B_y > 0$) 对磁尾场向电流发生率的控制作用有相同之处, 两种条件下场向电流的发生率都是随 IMF $|B_y|$ 的增大而增大的. 这主要是因为当 IMF B_y 分量增大时, 其向磁尾磁层中的渗透作用也随之变大, 加剧了磁层中磁场 (尤其是 B_y 分量) 的扰动, 所以观测到更多的场向电流事件. 研究同时还显示, 晨向 IMF 与昏向 IMF 对磁尾场向电流发生率的控制作用不同, 昏向 IMF 条件下场向电流发生率更高. 以往的研究显示, 磁尾磁场的扰动也会随 IMF 晨昏条件的改变而产生明显不同, 在很多情况下, 昏向 IMF 对磁场产生的扰动更大 [12,29]. 此外, Taguchi[18] 在研究夜侧低高度极光椭圆带附近的场向电流时发现, 场向电流事件也是在昏向 IMF 条件下更多. 通常认为, 磁尾等离子体片边界层区场向电流与极区低高度的场向电流是相连的. 由此可以看出, 本文结果与以往低高度场向电流研究结果具有很好的一致性.

以往关于内磁层和磁尾场向电流的研究中, 由于探测手段的限制, 只能通过单/双卫星的探测数据计算场向电流强度, 再通过卫星移动速度估算出电流片的厚度, 进而得到电流密度. 这样得到的电流密度存在较大误差. 同时由于选取的场向电流事件相对较少, 因而到目前为止尚未见统计研究给出磁尾场向电流密度与 IMF B_y 之间的关系. 本研究利用 Cluster 四颗卫星的磁场探测数据计算电流密度, 使其度精度有了很大提高, 同时选取大量场向电流事件, 研究了磁尾场向电流密度随 IMF B_y 的变化关系.

同样以 2 nT 为统计步长, 将 IMF B_y 划分为 10 个统计区间, 计算了不同 IMF B_y 条件下的平均场向电流密度. 图 4 显示: 当 IMF $B_y > 0$ 时, 场向电流密度的绝对值随着 IMF B_y 的增大而增大, 呈现出单调递增关系; 但是当 IMF $B_y < 0$ 时, 场向电流密度绝对值的最小值出现在 IMF B_y 为 $(-4, -2]$ nT 的区间. 于是这里分为 IMF $B_y < 0$ 和 IMF $B_y > 0$ 两种情况进行拟合分析, IMF $B_y < 0$ 时其相关系数 R 为 0.86, IMF $B_y > 0$ 时其相关系数 R 为 0.95. 这表明两种情况下, 场向电流密度的绝对值都是随 IMF $|B_y|$ 的增加而增大的, 符合线性相关关系. 只是当 IMF $B_y > 0$ 时, 线性相关关系更好. 两种条件下, 场向电流密度绝对值的最大值与最小值之比分别约为 1.48 (IMF $B_y < 0$ 时) 和 1.42 (IMF $B_y > 0$ 时), 电流增大

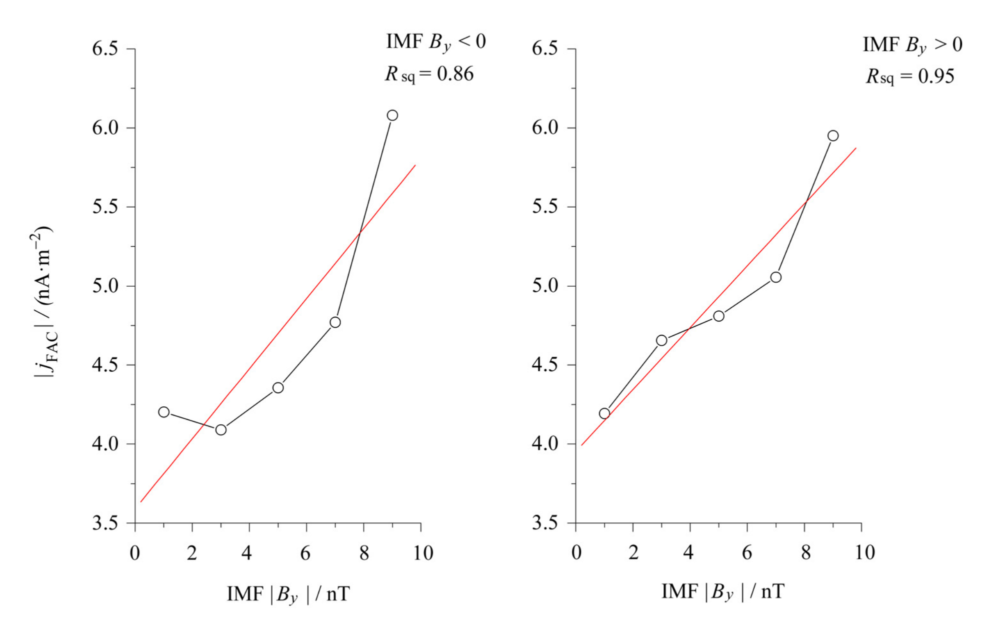


图 4　IMF $B_y < 0$ 和 IMF $B_y > 0$ 时场向电流密度绝对值 (黑线) 与其线性拟合结果 (红线)

Fig. 4　Absolute density of FAC (black line) and its linear fitting result (red line) at IMF $B_y < 0$ and IMF $B_y > 0$, respectively

幅度均达到约 50%, 表明 IMF B_y 的变化对场向电流的产生具有非常显著的控制作用.

通过图 3 和图 4 可以发现, 当 IMF $B_y < 0$ 时, 在 $(-4, -2]$ nT 区间内, 场向电流发生率和密度均达到最小值. 二者的一致性表明, IMF B_y 在此范围内对磁尾磁场产生的扰动是最小的, 因此场向电流密度和发生率均达到最小值. 但与此不同的是, 图 3 显示当 IMF $B_y < 0$ 时, IMF B_y 在 $(-10, -8]$ nT 区间时场向电流发生率略小于在 $(-8, -6]$ nT 区间的发生率. 而图 4 显示, IMF B_y 在 $(-10, -8]$ nT 区间时场向电流密度明显大于其在 $(-8, -6]$ nT 区间的密度. 于是产生了矛盾, 密度增大说明扰动增加, 观测到场向电流事件的概率也应增加. 出现这种情况可能的原因是, 在卫星穿越磁尾场向电流片时, 有些场向电流事件并没有被卫星观测到. 从表 1 中的数据也可以看到, IMF B_y 在 $(-10, -8]$ nT 范围内只观测到 42 个场向电流事件. 相对于 IMF $B_y < 0$ 时的情况, IMF $B_y > 0$ 时磁尾场向电流发生率和密度与 IMF $|B_y|$ 的关系更为简单, 呈现出单调递增的关系, 而且其线性相关性也更好. 这说明磁尾场向电流会受到 IMF 晨昏分量的控制并存在不对称性, 昏向 IMF 对场向电流的控制作用更为明显.

场向电流会受到 IMF B_y 分量的控制, 但是其过程是非常复杂的. 而且对于磁尾区域, 场向电流的发生率和密度与 IMF 各分量都有关系. 研究显示, IMF 南向期间, 磁尾的场向电流也会出现明显增强, 尤其是在亚暴期间其电流密度可以增大一个数量级 [11]. 本文主要研究了 IMF B_y 对磁尾场向电流发生率和密度的控制作用, 其结果对于了解场向电流发生率的控制因素有所促进.

有研究 [30−31] 认为, 场向粒子是场向电流的携带者. 关于场向电流与 IMF 的作用关系, 试图通过 IMF 与地球空间场向粒子的关系来开展研究. 电离层常会发生剧烈的扰动变化现象 [32−33]. 在强磁扰动期间, 电离层会产生上行带电粒子. 这些带电粒子是否对场向电流具有贡献作用, 是否受到 IMF 的影响, 需要进一步深入研究.

3　结论

利用 Cluster 和 ACE 卫星 2001 年和 2004 年 7—10 月期间的探测数据, 研究了磁尾等离子体片边界层区场向电流的发生率和密度受 IMF B_y 的控制作用. 通过对 IMF $|B_y| < 10$ nT 时 1657 个场向电流事件的统计研究发现, 场向电流发生率和密度明显受到 IMF B_y 的控制.

(1) 与 IMF B_y 分量为负时进行比较, IMF B_y 分量为正时场向电流事件的发生率更高 (约 55.6%).

(2) 当 IMF $|B_y| > 4\,\mathrm{nT}$ 时, 场向电流的发生率占总发生率的 77.4%.

(3) 场向电流的发生率随 IMF $|B_y|$ 的增大而增大, 且具有很好的线性相关关系, 当 IMF B_y 分量为正时, 这种相关性更好.

(4) 场向电流密度也随 IMF $|B_y|$ 的增大而增大, 同样具有很好的线性相关关系, 当 IMF B_y 分量为正时, 这种相关性更好.

以上结果均表明, IMF B_y 分量对磁尾场向电流的产生和变化具有很强的控制作用, 并且昏向 IMF 的变化与场向电流变化之间的关系更加密切.

参考文献

[1] ZMUDA A J, MARTIN J H, HEURING F T. Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1966, **66**: 5033-5045

[2] CUMMINGS W D, DESSLER A J. Field-aligned currents in the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1967, **72**: 1007-1013

[3] ERLANDSON R E, ZANETTI L J, POTEMRA T A, *et al.* IMF B_y dependence of region 1 Birkeland currents near noon [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 9804-9814

[4] RICH F J, HARDY D A, REDUS R H, *et al.* Northward IMF and patterns of high-latitude precipitation and field aligned currents: the February 1986 storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 7893

[5] CHENG Zhengwei, SHI Jiankui, ZHANG Ziying, *et al.* Effect of interplanetary magnetic field on the field-aligned currents occurrence in the magnetotail [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 396-402 (程征伟, 史建魁, 张子迎, 等. 行星际磁场对磁尾场向电流发生率的影响 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(4): 396-402)

[6] IIJIMA T A, POTEMRA T A, ZANETTI L J, *et al.* Largescale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: a new Birkeland current system [J]. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 7441

[7] JIAO Weixin, PU Zuyin. Dependence of field-aligned currents on the orientation of the interplanetary magnetic field [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2): 144-149 (焦维新, 濮祖荫. 大尺度场向电流的控制因素 [J]. 空间科学学报, 2000, **20**(2): 144-149)

[8] JUUSOLA L, KAURISTIE K, AMM O, *et al.* Statistical dependence of auroral ionospheric currents on solar wind and geomagnetic parameters from 5 years of CHAMP satellite data [J]. *Ann. Geophys.*, 2009, **27**: 1005-1017

[9] GJERLOEV J W, OHTANI1 S, IIJIMA T, *et al.* Characteristics of the terrestrial field-aligned current system [J]. *Ann. Geophys.*, 2011, **29**: 1713-1729

[10] WEIMER D R. Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived from Dynamics Explorer 2 data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 12889-12902

[11] CHENG Z W, SHI J K, DUNLOP M, *et al.* Influences of the interplanetary magnetic field clock angle and cone angle on the field-aligned currents in the magnetotail [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, **40**(20): 5355-5359. DOI:10.1002/2013GL056737

[12] KAYMAZ Z, SISCOE G L, LUHMANN J G, *et al.* Interplanetary magnetic field control of magnetotail magnetic field geometry: IMP 8 observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 11113-11126

[13] IIJIMA T, FUJII R, POTEMRA T A, *et al.* Field-aligned currents in the south polar cusp and their relationship to the interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, **81**: 2165-2174

[14] TAGUCHI S, SUGIURA M, WINNINGHAM J D, *et al.* Characteristics of the IMF B_y-dependent field-aligned currents in the cleft region based on DE 2 observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 1393-1407

[15] MASAKAZU W, SOFKO G J. Dayside four-sheet field-aligned current system during IMF B_y-dominated periods [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, **114**, A03208

[16] YAMAUCHI M, ARAKI T. The interplanetary magnetic field B_y-dependent field-aligned current in the dayside polar cap under quiet conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**: 2684-2690

[17] ZHOU X W, RUSSELL C T, LE G. Local time interplanetary magnetic field B_y dependence of field-aligned currents at high altitudes [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 2533-2539

[18] TAGUCHI S. B_y-controlled field-aligned currents near midnight auroral oval during northward interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A8): 12231-12243

[19] TAGUCHI S, SUGIURA M, IYEMORI T, *et al.* B_y-controlled convection and field-aligned currents near midnight auroral oval for northward interplanetary magnetic field [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 6027-6044

[20] SHI J K, CHENG Z W, ZHANG T L, *et al.* Properties of field aligned current in plasma sheet boundary layers in magnetotail: Cluster observation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(2): 029401

[21] CHENG Z W, SHI J K, ZHANG T L, *et al.* The relations between density of FACs in the plasma sheet boundary layers and *Kp* index [J]. *Sci. China: Tech. Sci.*, 2011, **54**: 2987-2992

[22] CHENG Z W, SHI J K, ZHANG T L, *et al.* Field-aligned currents at the PSBL on 17 August 2001 storm: relationships with solar wind conditions [J]. *Chin. Phys. Lett.*,

2011, **28**(9): 099401

[23] DUNLOP M W, BALOGH A, GLASSMEIER K H. Four-point Cluster application of magnetic field analysis tools: the Curlometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A11): 1384-1397

[24] ROBERT P, DUNLOP M W. Analysis Methods for Multi-spacecraft Data [M]. Netherlands: ESA Publications Division, 1998: 395-418

[25] XIAO C J, PU Z Y, HUANG Z Y, *et al.* Multiple flux rope events at the high latitude magnetopause on January 26, 2001: current density calculating [J]. *Chin. J. Geophys.* 2004, **47**(4): 555-561 (肖池阶, 濮祖荫, 黄宗英, 等. 2001 年 1 月 26 日磁层顶多重磁通量管事件的观测研究 — 空间电流密度计算及分析 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(4): 555-561)

[26] SHI J K, CHENG Z W, ZHANG T L, *et al.* South-north asymmetry of field-aligned currents in the magnetotail observed by Cluster [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A07228. DOI:10.10 29/2009JA014446

[27] OHTANI S, KOKUBUN S, ELPHIC R C, *et al.* Field-aligned current signatures in the near-tail region: 1. ISEE observations in the plasma sheet boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 9709-9720

[28] COLLIER M R, SLAVIN J A, LEPPING R P, *et al.* Timing accuracy for the simple planar propagation magnetic field structures in the solar wind [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 2509-2512

[29] YAN G Q, SHEN C, LIU Z X, *et al.* A statistical study on the correlations between plasma sheet and solar wind based on DSP explorations [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **90**: 2961-2966

[30] ZHANG Z Y, SHI J K, CHENG Z W, *et al.* Field-aligned electrons in polar region observed by Cluster on 30 September 2001 [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2012, **29**(9): 099401

[31] SHI J K, ZHANG Z Y, TORKAR K, *et al.* Temporal and spatial scales of a high-flux electron disturbance in the cusp region: Cluster observations [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2014, **119**: 4536-4543

[32] ROMANOVA E B, ZHEREBTSOV G A, RATOVSKY K G, *et al.* Response of the ionospheric F_2-region over Irkutsk and Hainan to strong geomagnetic storms [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(5): 494-500

[33] RATOVSKY K G, SHI J K, OINATS A V *et al.* Comparison of diurnal, seasonal and solar cycle variations of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 143-153